

## System and method for diagnosing jet engine conditions

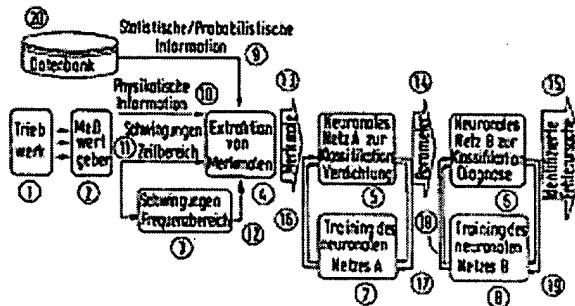
**Patent number:** DE19808197  
**Publication date:** 1999-09-09  
**Inventor:** MORENO-BARRAGAN JORGE (DE)  
**Applicant:** MOTOREN TURBINEN UNION (DE)  
**Classification:**  
 - **international:** G01M15/00; G01M7/02; G01N33/30; G01N15/00;  
 G06F19/00; G01H1/00; G06F15/18  
 - **european:** G01N33/00D2D2N, G05B19/406  
**Application number:** DE19981008197 19980227  
**Priority number(s):** DE19981008197 19980227

### Also published as:

-  WO9944106 (A1)
-  EP0988583 (A1)
-  US6574613 (B1)

### Abstract of DE19808197

The invention relates to a system and a method for diagnosing the conditions of a powerplant. The system and method are especially aimed at extracting the characteristics of different sources of information and processing them. Together with a series connection of two neuronal networks, these characteristics form the core of the system and the method. This ensures that a reliable diagnosis of the conditions of the powerplant is carried out and especially that errors are detected. The powerplant can then be maintained according to its current condition.



Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND  
  
DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑯ **Offenlegungsschrift**  
⑯ **DE 198 08 197 A 1**

⑯ Int. Cl. 5:  
**G 01 M 15/00**

G 01 M 7/02  
G 01 N 33/30  
G 01 N 15/00  
G 06 F 19/00  
G 01 H 1/00  
G 06 F 15/18

⑯ Aktenzeichen: 198 08 197.9  
⑯ Anmeldetag: 27. 2. 98  
⑯ Offenlegungstag: 9. 9. 99

**DE 198 08 197 A 1**

⑯ Anmelder:

MTU Motoren- und Turbinen-Union München  
GmbH, 80995 München, DE

⑯ Erfinder:

Moreno-Barragan, Jorge, Dr., 80997 München, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ System und Verfahren zur Diagnose von Triebwerkszuständen  
⑯ Es werden ein System und ein Verfahren zur Diagnose von Triebwerkszuständen vorgeschlagen. Insbesondere sind das System und das Verfahren auf eine Extraktion von Merkmalen unterschiedlicher Informationsquellen und deren Bearbeitung gerichtet. Diese Merkmale zusammen mit einer Hintereinanderschaltung zweier Neuronaler Netze bilden den Kern des Systems und Verfahrens, so daß eine zuverlässige Diagnose von Triebwerkszuständen, insbesondere eine Fehlererkennung möglich ist. Dadurch wird eine Wartung entsprechend dem aktuellen Triebwerkszustand ermöglicht.

**DE 198 08 197 A 1**

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein System und Verfahren zur Diagnose von Triebwerkszuständen.

Hierkürlich erfolgt die Diagnose von Triebwerkszuständen unter Verwendung von Schwingungssignalen aufgrund von Amplitudengrenzen, die aus der allgemeinen Erfahrung abgeleitet wurden, und/oder typischer Merkmale aus Schwingungssignaturen, der Erfahrung aus Ereignissen während der Entwicklungsphase bzw. der Erfahrung aus dem Zertifizierungsprozeß.

Es erfolgen in der Regel kostspielige und zeitintensive Modifikationen in der Serienproduktion.

Die Schwingungsdiagnose wird dabei von verschiedenen qualifizierten Spezialistenteams durchgeführt, ohne gezielten Erfahrungsaustausch zwischen Betreiber und Hersteller von Triebwerken und ohne systematische Erfassung und Auswertung von Fehlern, Begleiterscheinungen bzw. Anzeichen und deren Ursachen.

Somit besteht bei der bisher üblichen Schwingungsdiagnose von Triebwerkszuständen unter anderem das Problem, daß wenigen Meßpositionen nur eine begrenzte Menge von Informationen zur Auswertung gegenüber steht. Es gibt zwar aus der Entwicklungsphase Fehlerkataloge; diese sind aber meistens sehr lückenhaft. Der Einfluß einer großen Anzahl von Parametern, wie beispielsweise von Baustandards, Toleranzen, Größe und Position von Unwuchten, Temperaturauswirkungen, Leistungs- und Flugparametern usw., sowie Nichtlinearitäten und Meßungsgenauigkeiten bleibt weitgehend unberücksichtigt.

Daher können bei dieser Art von Schwingungsdiagnose gefährliche Schwingungsbedingungen während des Betriebs unerkannt weiterbestehen, es können größere Sekundärschäden durch zu späte Fehlererkennung auftreten und der Wartungsaufwand steigt, da zumeist eine Triebwerkszerlegung erforderlich ist.

Deshalb ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein System und Verfahren zur Diagnose von Triebwerkszuständen zu schaffen, bei dem die Sicherheit durch ein Erkennen gefährlicher Schwingungsbedingungen erhöht wird, größere Sekundärschäden durch eine frühe Fehlererkennung vermieden werden, der Wartungsaufwand durch gezielte Elimination der Schwingungsursachen verringert wird und eine Wartung entsprechend dem aktuellen Triebwerkszustand (d. h. "On-Condition") erfolgt.

Diese Aufgabe wird durch die in den Patentansprüchen 1 bzw. 8 aufgezeigten Maßnahmen gelöst. In den Unteransprüchen sind vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen angegeben.

In der nachfolgenden Beschreibung ist ein Ausführungsbeispiel der Erfindung in Verbindung mit der Zeichnung beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1A eine schematische Darstellung des Aufbaus eines Neuronalen Mehrschicht-Netzes zur Informationsverdichtung,

Fig. 1B eine schematische Darstellung des Aufbaus eines Neuronalen Mehrschicht-Netzes zur Informationsverknüpfung,

Fig. 1C einen Aufbau einer Neuroneneinheit, die in den Netzen gemäß Fig. 1A und Fig. 1B verwendet wird, und

Fig. 2 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung des Aufbaus des erfindungsgemäßen Systems zur Diagnose von Triebwerkszuständen.

Der Schwerpunkt der Erfindung liegt bei einem Verfahren und einer Vorrichtung für die Extraktion von Merkmalen aus unterschiedlichen Informationsquellen und deren Bearbeitung. Diese Merkmale, die den Triebwerkszustand umfas-

send charakterisieren, bilden den Kern des Systems zusammen mit einer Hintereinanderschaltung zweier Neuronaler Netze.

Zum Generieren von Schwingungsmustern (Trainingsdaten) zur Diagnose von Triebwerkszuständen kann sowohl eine Simulation als auch eine Messung verwendet werden. Beide Verfahren besitzen ihre Vor- und Nachteile, die im folgenden erläutert werden.

Bei einer Simulation ist es vorteilhaft, daß eine Analyse verschiedener vordefinierter Fehlerfälle und außerdem eine Kombination davon erfolgt. Die Auswertung kann dabei an beliebigen Positionen erfolgen, deren Menge nur von der Anzahl der Freiheitsgrade des Simulationsmodells beschränkt ist. Es können extreme, zerstörende Fälle analysiert werden. Dabei ist es unter anderem vorteilhaft, reine Signale ohne Rauschanteile zu verwenden. Simulationen von Triebwerksläufen sind verhältnismäßig kostengünstig.

Nachteilig wirkt es sich jedoch bei der Simulation aus, daß sie bestimmten Annahmen unterworfen ist, z. B. bei der Modellierung von Verbindungen und Dämpfungseigenschaften, usw. Zu den weiteren Nachteilen der Simulation zählen deren begrenzte Gültigkeit, z. B. nur für ein bestimmtes Frequenzband (normalerweise der untere Frequenzbereich), und daß manche Effekte nur mit sehr hohem Aufwand berücksichtigt werden können. Darüber hinaus beschreiben die Simulationsmodelle nur bestimmte Eigenschaften der Struktur mit einer hohen Genauigkeit. Andere Eigenschaften, wie z. B. thermische Wirkungen, usw. werden dagegen nur global berücksichtigt.

Demgegenüber besitzt die Messung die folgenden Vorteile. Es wird die tatsächliche, gegenwärtige Struktur verwendet, keine physikalische Idealisierung derselben. Insbesondere bei den Entwicklungs- und Zertifizierungsprozessen werden bestimmte Lastfälle analysiert, welche bestimmten Fehlern entsprechen, z. B. Blattverlust an verschiedenen Stufen der einzelnen Komponenten des Triebwerks. Außerdem können bei Messungen zusätzlich Betriebsparameter berücksichtigt werden, insbesondere bei Untersuchungen im Flug werden eine Reihe von zusätzlichen Parametern aufgezeichnet.

Jedoch ergeben sich auch bei der Messung Probleme. Nachteilig wirkt sich die Ungenauigkeit bzw. Streuung der Messung aus, ebenso wie Meßfehler oder Rauscheffekte. Zusätzlich sind die Individualität der Triebwerke und die veränderlichen Bezugsbedingungen problematisch. Die Beobachtung kann nur an wenigen festen Positionen durchgeführt werden.

Daher ergeben sich die folgenden Erfordernisse zur Überwindung dieser Nachteile und Probleme:

Es muß eine extensive numerische Erzeugung von Schwingungskennungssignalen erfolgen, welche von einer Generierung experimenteller Signaturen begleitet werden soll. Dazu ist eine Definition von Parametern, die beobachtet und zur Diagnose verwendet werden sollen, ebenso wie eine Erstellung eines Fehlerkatalogs erforderlich. Die zu identifizierenden Fehler müssen definiert werden und eine Analyse von Verbindungen bzw. einer Beziehung zwischen Fehlern muß stattfinden.

Ebenso ist eine Extraktion von Merkmalen und eine Analyse von Verbindungen bzw. Beziehungen zwischen Symptomen, Begleiterscheinungen bzw. Anzeichen nötig. Parameter müssen identifiziert werden und Triebwerksmodelle entwickelt und Verbindungen bzw. Beziehungen zwischen Fehlern und Begleiterscheinungen bzw. Anzeichen erzeugt werden.

Weiterhin ist eine Entwicklung von umfassenden Diagnosesystemen auf der Grundlage von Neuronalen Netzen unter Berücksichtigung von verschiedenen physikalischen Infor-

mationen (Schwingungen, Leistungsmerkmalen, Temperaturen usw.) und statistischen bzw. probabilistischen Informationsquellen erforderlich.

Die Eigenschaften der Neuronalen Netze, wie beispielsweise der Typ bzw. der Art, die Architektur, das Trainingsverfahren, usw. müssen definiert werden. Darüber hinaus sollen Untersuchungen über eine mögliche Anwendung von Neuronalen Netzen in Kombination mit Fuzzy-Logik erfolgen. Schließlich werden die Simulationsmodelle bzw. -verfahren und die Meßtechniken über Empfindlichkeits- und Korrelationsanalyse optimiert.

Die Hauptprobleme, die bei meßtechnischen Betrachtungen auftreten, sind die Datenstreuung, die Identifizierung von Rauschdaten, die begrenzten Datenmengen für eine vollständige Analyse und die sich verändernde Bezugsbereichung für jedes Triebwerk. Mögliche Problemlösungen sind eine Musterzuordnung, eine Klassifizierung und eine Identifizierung der Information mittels neuronaler bzw. neuro-fuzzy Methoden.

Erfundungsgemäß werden zur Diagnose von Triebwerksszuständen nicht, wie herkömmlich, nur die erfaßten Schwingungssignale des Triebwerks zur Diagnose verwendet, sondern auch andere Betriebsparameter, wie beispielsweise Höhe, Temperatur, usw., die den Zustand des Triebwerks ebenfalls mitbeeinflussen. Weiterhin sollen auch statistische und probabilistische Betrachtungen zusätzlich berücksichtigt werden.

Dabei erfolgt die Diagnose des Triebwerkszustands unter Verwendung eines lernenden, intelligenten Systems. Dieses System wird von der Entwicklungsphase bis zur Serienproduktion eingesetzt. Es werden zusätzliche physikalische Informationen, wie Betriebsparameter, Temperaturen, Leistungsparameter, usw. zur Diagnose verwendet. Der gegenwärtige Baustandard und die Vorgeschichte des Triebwerks so wie die Symptome und deren verifizierte Fehlerursachen werden in dem erfundungsgemäßen System und Verfahren systematisch aufgezeichnet und ausgewertet.

Insbesondere wird das intelligente System unter Verwendung physikalischer Simulationsmodelle trainiert, wobei die physikalischen Modelle unter Verwendung einer Korrelation mit den Messungen iterativ bzw. schrittweise verbessert werden. Zusätzlich wird das intelligente System mit Hilfe tatsächlicher bzw. realer Ereignisse und Vorfälle trainiert.

Außerdem werden die Fehlerfälle aller Kunden unter Verwendung einer gemeinsamen Datenbasis bzw. Datenbank von den Produzenten gesammelt und ausgewertet.

In einem derartigen intelligenten System werden Neuronalen Netze verwendet. Ein Neuronales Netz besteht aus einer Vielzahl von Neuronen, von denen jedes eine nichtlineare Eingangs/Ausgangskennlinie besitzt und die durch Verbindungselemente mit jeweils wechselseitig unabhängigen Gewichtskoeffizienten miteinander verbunden sind. Die Gewichtskoeffizienten können durch einen Lernvorgang verändert werden. Dabei wird das Ausgangssignal des Neuronalen Netzes aufgrund einer besonderen Kombination von Eingangswerten mit einem bekannten Wert (Lehrwert) verglichen, der zu diesen Eingangswerte korrespondiert. Aus dieser Gegenüberstellung wird eine Modifikation der Werte der Gewichtskoeffizienten, wie beispielsweise um den Ausgangswert vom Neuronalen Netz näher zum Lehrwert zu bringen, abgeleitet. Dazu wird ein Lernalgorithmus bzw. -rechenverfahren verwendet. Der Lernvorgang wird aufeinanderfolgend für eine Anzahl von verschiedenen Lehrwerten und entsprechenden Eingangswertkombinationen wiederholt. Dies gilt insbesondere für das Neuronale Netz gemäß Fig. 1B, bei dessen Training z. B. die Methode der überwachten "Back Propagation" verwendet werden kann. Weiterhin besteht auch die Möglichkeit andere Methoden

für das Training der Neuronalen Netze einzusetzen. Dabei handelt es sich beispielsweise um nicht überwachte Verfahren (z. B. Methode der selbstorganisierenden Karten von Kohonen), welche insbesondere für Klassifikationsaufgaben 5 wie im Neuronalen Netz von Fig. 1A verwendet werden.

Ein Neuronales Mehrschicht-Netz gemäß Fig. 1A und Fig. 1B ist aus aufeinanderfolgenden Schichten von Neuronen gebildet, mit Zwischenverbindungen durch Verbindungselemente, die zwischen den Neuronen einer Schicht 10 und Neuronen von vorhergehenden und nachfolgenden Schichten verbunden sind. Die Verbindungselemente multiplizieren die Ausgangssignale mit Gewichtskoeffizienten  $W_{n,ij}$  bzw.  $W_{n,j,k}$ . Während des Lernvorgangs eines Neuronalen Netzes sind diese Gewichtskoeffizienten  $W_{n,ij}$  bzw. 15  $W_{n,j,k}$  veränderlich und werden wechselseitig unabhängig bestimmt. Die Werte der Gewichtskoeffizienten  $W_{n,ij}$ , welche die Eingangs- mit der Zwischenschicht verbinden, können als die jeweiligen Kopplungsstärken zwischen Neuronen der Zwischenschicht  $U_{2,j}$  und den Neuronen der Eingangsschicht  $U_{1,i}$  betrachtet werden. Wenn die Ausgangsschicht  $U_{3,k}$  des Neuronalen Netzes nur aus einem einzelnen Neuron  $U_{3,1}$  besteht, wird ein einzelner Ausgangswert von dem letzten Neuron des Neuronalen Netzes ansprechend auf eine bestimmte Kombination von der Eingangsschicht des 20 Neuronalen Netzes zugeführten Eingangssignalwerten erzeugt.

Fig. 1C zeigt ein Neuron 30, das aus einem Eingangsabschnitt 20 und einem Ausgangsabschnitt 40 bestehend betrachtet werden kann. Der Eingangsabschnitt 20 summiert 30 die ihm zugeführten gewichteten Eingangssignalwerte auf, wobei jeder dieser Eingangssignalwerte mit einem entsprechenden Gewichtskoeffizienten  $W_{m,ij}$  multipliziert wird. Das sich ergebende summierte Ausgangssignal, das vom Eingangsabschnitt 20 des Neurons 30 erzeugt wird, wird als 35  $X_{m,i}$  bezeichnet und dem Ausgangsabschnitt 40 des Neurons zugeführt. Der Ausgangsabschnitt 40 führt eine Verarbeitung entsprechend einer nicht-linearen Funktion  $Y=F(x)$  aus, um das Ausgangssignal  $Y_{n,i}$  zu erhalten, das einem oder mehreren Neuronen der nachfolgenden Schicht zugeführt 40 wird, nachdem es mit jeweiligen Gewichtskoeffizienten multipliziert wurde.

Im folgenden wird nun schematisch das erfundungsgemäße System und Verfahren zur Diagnose von Triebwerksszuständen unter Bezugnahme auf Fig. 2 beschrieben.

Das erfundungsgemäße System und Verfahren erhält über Meßwertegeber 2 physikalische Informationen 10, wie z. B. Druck und Temperatur in verschiedenen Ebenen eines Triebwerks 1 sowie auch Parameter aus der Gasverfolgung innerhalb des Triebwerks 1 und aus der Partikelanalyse in 50 verbrauchtem Öl. Weiterhin erhält das System Schwingungsinformationen im Zeitbereich 11 und nach Verarbeitung derselben durch eine Schwingungsanalyseeinrichtung 3 Informationen im Frequenzbereich 12. Zusätzlich werden dem System Informationen übertragen, welche aus statistischen und probabilistischen Betrachtungen 9 aus Daten einer entsprechenden Datenbank 20 resultieren. Aus dieser Fülle von Informationen werden unter Anwendung spezieller Algorithmen von einem Modul zur Merkmalextraktion 4 55 Merkmale 13 extrahiert, die das Triebwerk umfassend charakterisieren.

Das erfundungsgemäße System bzw. Verfahren verwendet ein erstes Neuronales Netz 5, da in der Eingangsschicht mehr Neuronen als in der Ausgangsschicht aufweist. Die Aufgabe dieses Netzes ist, die zugeführten Merkmale 13 zu 60 klassifizieren und vor allem Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen zu identifizieren. Es werden Gruppen von Merkmalen gebildet, welche durch ausgewählte "Vertreter", die hier genannten Parameter 14, im wei-

teren Prozeß berücksichtigt werden. Somit wird eine Datenverdichtung durch Beseitigung von redundanten Informationen erreicht.

Das erste Neuronale Netz **5** wird unter Anwendung verschiedener Methoden durch eine erste Lehreinrichtung **7** trainiert. Es wird unter anderem die Methode der "Back Propagation" mit den Datensätzen **16** und **17** verwendet, aber auch die Methode der "Selbstorganisierenden Karten" eingesetzt.

Weiterhin ist im erfundungsgemäßen System und Verfahren ein zweites Neuronales Netz **6** vorgesehen. Eingangssignale des zweiten nachgeschalteten Neuronalen Netzes **6** sind die identifizierten Parameter **14**. Die Aufgabe dieses zweiten Neuronalen Netzes ist die Klassifikation und Erkennung von Zusammenhängen zwischen den Parametern **14** und bestimmten Fehlerkonstellationen **15**. Dieser Vorgang wird im Rahmen des erfundungsgemäßen Systems Diagnose genannt, da die Fehler **15** über die Parameter **14** und diese wiederum über die Merkmale **13** mit physikalisch interpretierbaren Eigenschaften des Triebwerks **1** kausal assoziiert werden.

Die verschiedenen Schichten des zweiten Neuronalen Netzes **6** bestehen aus jeweils mehreren Neuronen. Die Anzahl der verdeckten Schicht wird, wie üblich bei Klassifizierungsprozessen, relativ klein sein (1 oder 2 Schichten). Die Anzahl der Neuronen wird jedoch in der Regel größer als die der äußeren Schichten sein. Ausgangssignal des zweiten Neuronalen Netzes ist ein Diagnosesignal, welches auf eine bestimte Fehlerkonstellation **15** hinweist.

Das Training des zweiten Neuronalen Netzes durch eine zweite Lehreinrichtung **8** wird mit Hilfe der überwachten "Back Propagation"-Methode durchgeführt. Dabei werden bekannte Fehler **19** und deren Symptome in Form von Parametern **18** eingesetzt.

Nun wird genauer darauf eingegangen, welche Eingangssignale dem Modul zur Merkmalsextraktion **4** zugeführt werden. Wie vorstehend bereits erwähnt, sind diese Eingangsdaten Schwingungssignale im Zeit- und Frequenzbereich **11** bzw. **12** und zusätzlich physikalische **10** sowie statistisch/probabilistische **9** Beobachtungsparameter. Im Modul zur Merkmalsextraktion werden diese Informationen getrennt verarbeitet, es werden aber gemeinsame Kennungen für eine weitere Bearbeitung vorgesehen.

Zunächst zu den Schwingungssignalen im Zeitbereich **11**. Hierbei werden Verfahren und Techniken verwendet, wie sie zur Spracherkennung üblich sind. Außerdem werden der Effektivwert (RMS = root mean Square), Hüllkurven, Modulationen, Absolutwerte, Leistungsanalyse, statistische Parameter (Standardabweichungen, usw.), Verteilungsfunktionen, Wavelet-Analyse, usw. der Schwingungssignale im Zeitbereich als Indikatoren verwendet.

Dagegen wird für die Schwingungssignale im Frequenzbereich **12** eine Darstellung in Form eines sogenannten Wasserfalldiagramms gewählt. Diese graphische Informationsdarstellung wird dann mit Bildverarbeitungsverfahren behandelt und daraus werden entsprechende Merkmale ausgewertet. Somit wird eine globale Betrachtung realisiert, da alle Bereiche des Bildes (Wasserfalldiagramm) mit der gleichen Gewichtung verarbeitet werden. Weiterhin werden geometrische Betrachtungen durchgeführt, um Indikatoren, wie beispielsweise den Schwerpunkt des gesamten Bildes oder Schwerpunkte bestimmter Bildregionen, welche nach bestimmten physikalischen Überlegungen definiert werden (z. B. subharmonischer oder superharmonischer Bereich), zu erzeugen. Die sogenannten "Sky-Lines" des Wasserfalldiagramms, betrachtet aus der Perspektive der Frequenz- bzw. der Zeit/Drehzahlachse, liefern zusätzliche Bildmerkmale.

Außerdem wird die Information der Wasserfalldiagramme numerisch erfaßt. Somit ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, Methoden aus der Matrizen- und Vektorrechnung (verschiedene Normen, Längen, usw.), wie beispielsweise Ermittlung von maximalen Werten, Mittelwerten, Summennormen, Euklidischen Normen, Korrelationskoeffizienten, Regressionskoeffizienten, Standardabweichungen, usw. zur Gewinnung von Indikatoren einzusetzen. Weiterhin werden aus der Entwicklung der Amplituden der zu der Betriebsdrehzahl des jeweiligen Rotors, deren Mehrfachen und Kombinationen zugeordneten Schwingungen Informationen extrahiert, welche die Erzeugung zusätzlicher Merkmale erlauben. Eine andere Alternative der Bearbeitung der numerischen Information ist die Anwendung von Verfahren zur

Systemidentifikation (direct estimation method usw.) im Frequenzbereich bezogen auf einzelne Spektren (d. h. quasi-konstante Drehzahl) und/oder auf die oben genannten Verläufe der Drehzahlharmonischen. Die Berücksichtigung von Übertragungsfunktionen sowie eine Verteilungsanalyse der numerischen Daten liefern zusätzliche Indikatoren aus den Schwingungssignalen im Frequenzbereich.

Eine vollständig andere Quelle von Merkmalen sind Beobachtungen von zusätzlichen physikalischen Parametern **10**. Zu dieser Gruppe von Parametern zählen der Ölverbrauch bei bestimmten Triebwerksläufen, Leistungsbezugszahlen wie Druck und Temperatur in bestimmten Triebwerksebenen, Partikelanalyse im verbrauchten Öl und in den Triebwerksabgasen sowie die Gasweganalyse. Eine andere Alternative ergibt sich aus der statistischen bzw. probabilistischen Betrachtung der Fehler **9**. Mit Hilfe dieser Analyse können bestimmte Triebwerkskomponenten oder -bauteile als besonders anfällig eingestuft werden. Diese Information wird in Form von Merkmalen verwendet.

Die Merkmale **13** resultierend aus dem entsprechenden Modul zur Merkmalsextraktion **4** sind dann die Eingangsdaten der Eingangsschicht des ersten Neuronalen Netzes **5**. Die Aufgabe dieses Netzes ist die Komprimierung der durchaus umfangreichen Eingangsinformationen und die Generierung von weitgehend unabhängigen Parametern **14**.

Dem zweiten Neuronalen Netz **6** werden die vom ersten Neuronalen Netz **5** ausgegebenen Parameter **14** zugeführt und dieses gibt daraufhin ein entsprechendes Diagnosesignal (Fehlerignal) **15** aus.

Somit kann durch die Verwendung der zwei Neuronalen Netze mit dem erfundungsgemäßen System bzw. Verfahren eine zuverlässige Diagnose des Triebwerkszustands erreicht werden.

Anstelle der beiden Neuronalen Netze könnten auch Neuronale Netze in Verbindung mit Fuzzy-Logik oder reine Fuzzy-Logik-Schaltungen verwendet werden.

#### Patentansprüche

1. System zur Diagnose von Triebwerkszuständen, mit:

einer Einrichtung zur Zuführung statistisch/probabilistischer Informationen (9) über die Fehlerquote einzelner Triebwerkskomponenten resultierend aus einer Bewertung einer entsprechenden Datenbank (20) und/oder

einer Vielzahl von Meßwertgebern (2) zur Erfassung physikalischer Informationen (10), wie beispielsweise Drücke und Temperaturen in verschiedenen Triebwerksebenen und außerdem Parameter aus einer Partikelanalyse in verbrauchtem Öl und in Triebwerksabgasen sowie Parameter aus einer Gasweganalyse, und einer Vielzahl von Meßwertgebern (2) zur Erfassung von Schwingungsinformationen im Zeitbereich (11)

von einem Triebwerk (1), einer Schwingungsanalyseeinrichtung (3) zur Erzeugung von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) aus den Schwingungsinformationen im Zeitbereich (11), einem Modul zur Merkmalextraktion (4) zur Verarbeitung der physikalischen Informationen (10) und/oder der statistisch/probabilistischen Informationen (9) und der Schwingungsinformationen im Zeit- und Frequenzbereich (11, 12) und zur Extraktion einer Reihe von Merkmalen (13), die den Triebwerkszustand umfassend beschreiben, einem ersten Neuronalen Netz (5), an das die Merkmale (13) angelegt sind, zur Klassifizierung der Merkmale (13), zur Identifizierung von Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und zur dementsprechenden Durchführung einer Informationsverdichtung und zur Ausgabe von Parametern (14), wobei das erste Neuronale Netz (5) eine Eingangsschicht, eine oder mehrere Zwischenschichten und eine Ausgangsschicht aus Neuronen aufweist, wobei die Eingangsschicht mehr Neuronen als die Zwischenschicht(en) und diese wiederum mehr Neuronen als die Ausgangsschicht aufweist und die Neuronen einer Schicht über eine Vielzahl von Verbindungselementen mit variablen Gewichtskoeffizienten verbunden sind, einer ersten Lehreinrichtung (7) zur Zuführung von Lerneingangssignalen (16) zum ersten Neuronalen Netz (5) und zum Vergleich des daraufhin vom ersten Neuronalen Netz (5) ausgegebenen Ausgangssignals (14) mit einem Lehreingangssignal (17) und zur Änderung von variablen Gewichtskoeffizienten des ersten Neuronalen Netzes (5) mittels Anwendung eines vorbestimmten Lernalgorithmus entsprechend den Differenzen zwischen dem Lehreingangssignal (17) und dem Ausgangssignal (14) oder zur Realisierung eines nicht überwachten Trainings des ersten Neuronalen Netzes (5) mit Hilfe der Lerneingangssignale (16) allein, einem zweiten Neuronalen Netz (6), an das die durch das erste Neuronale Netz (5) ausgegebenen Parameter (14) angelegt sind, zur Klassifizierung der Parameter (14), zur Erkennung von Zusammenhängen zwischen den Parametern (14) und bestimmten Fehlerkonstellationen, zur dementsprechenden Durchführung einer Informationsverknüpfung und zur Ausgabe eines Diagnosesignals (15), wobei das zweite Neuronale Netz (6) eine Eingangsschicht, eine oder mehrere Zwischenschichten und eine Ausgangsschicht aus Neuronen aufweist, wobei die Eingangs- und die Ausgangsschicht weniger Neuronen als die Zwischenschicht(en) aufweisen, und die Neuronen einer Schicht mit den Neuronen der ihr nachfolgenden Schicht über eine Vielzahl von Verbindungselementen mit variablen Gewichtskoeffizienten verbunden sind, und einer zweiten Lehreinrichtung (8) zur Zuführung von Lerneingangssignalen (18) zum zweiten Neuronalen Netz (6) und zum Vergleich des daraufhin vom zweiten Neuronalen Netz (6) erhaltenen Ausgangssignals (15) mit einem Lehreingangssignal (19) und zur Änderung von variablen Gewichtskoeffizienten des zweiten Neuronalen Netzes (6) mittels Anwendung eines vorbestimmten Lernalgorithmus entsprechend den Differenzen zwischen dem Lehreingangssignal (19) und dem Ausgangssignal (15).

2. System nach Anspruch 1, wobei das Modul zur Merkmalextraktion (4) physikalische Parameter (10), wie Ölverbrauch bei bestimmten Triebwerksläufen,

Leistungsbezugszahlen wie Druck und Temperatur in bestimmten Triebwerksebene, Parameter aus einer Partikelanalyse in verbrauchtem Öl und in Triebwerksabgasen sowie Parameter aus einer Gasweganalyse, verwendet.

3. System nach Anspruch 1, wobei das Modul zur Merkmalextraktion (4) Verfahren verwendet, wie sie zur Spracherkennung üblich sind, und Effektivwerte, Eigenschaften der Hüllkurven, Modulationen, Absolutwerte, Leistungsanalysen, statistische Parameter, Verteilungsfunktionen, Wavelet-Analyse usw. der Schwingungsinformationen im Zeitbereich (11) als Merkmale extrahiert.

4. System nach Anspruch 1, wobei die Schwingungsanalyseeinrichtung (3) die Schwingungssignale im Zeitbereich behandelt und daraus entsprechende Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) ermittelt.

5. System nach einem der Ansprüche 1 oder 4, wobei das Modul zur Merkmalextraktion (4) eine Informationsdarstellung in Form eines sogenannten Wasserfalldiagramms verwendet, diese Informationsdarstellung mit Bildbearbeitungsverfahren behandelt und daraus entsprechende Merkmale aus den Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) ermittelt.

6. System nach einem der Ansprüche 1 oder 4, wobei das Modul zur Merkmalextraktion (4) außerdem geometrische Betrachtungen des gesamten Bilds oder bestimmter Bildregionen durchführt und/oder das Modul zur Merkmalextraktion (4) außerdem sogenannten "Sky-Lines" des Wasserfalldiagramms aus der Perspektive der Frequenz- bzw. der Zeit/Drehzahlachse betrachtet.

7. System nach Anspruch 1 oder 4, wobei das Modul zur Merkmalextraktion (4) die Schwingungsinformation der Wasserfalldiagramme außerdem numerisch erfaßt und Methoden aus der Matrizen- und Vektorrechnung oder Verfahren zur Systemidentifikation im Frequenzbereich zur Gewinnung von Merkmalen aus den Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) und/oder Übertragungsfunktionen sowie eine Verteilungsanalyse der numerischen Daten einsetzt.

8. System nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei anstelle der ersten und zweiten Neuronalen Netze (5, 6) Neuronale Netze in Verbindung mit Fuzzy-Logik oder reine Fuzzy-Logik-Schaltungen vorgesehen sind.

9. Verfahren zur Diagnose von Triebwerkszuständen, mit den Schritten:

Zuführen statistisch/probabilistischer Informationen (9) über die Fehlerquote einzelner Triebwerkskomponenten resultierend aus einer Bewertung einer entsprechenden Datenbank (20) und/oder Erfassen physikalischer Informationen (10), wie beispielsweise Drücke und Temperaturen in verschiedenen Triebwerksebenen, durch eine Vielzahl von Meßwertgebern (2), außerdem Parameter aus einer Partikelanalyse in verbrauchtem Öl und in Triebwerksabgasen sowie Parameter aus einer Gasweganalyse, und/oder Erfassen von Schwingungsinformationen im Zeitbereich (11) von einem Triebwerk (1) durch eine Vielzahl von Meßwertgebern (2), Erzeugen von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) aus den Schwingungsinformationen im Zeitbereich (11) durch eine Schwingungsanalyseeinrichtung (3), Verarbeiten der physikalischen Informationen (10) und/oder der statistisch/probabilistischen Informatio-

nen (9) und/oder der Schwingungsinformationen im Zeit- und Frequenzbereich (11, 12) und Extrahieren einer Reihe von Merkmalen (13), die den Triebwerkszustand umfassend beschreiben, durch ein Modul zur Merkmalextraktion (4),  
 5 Klassifizieren der Merkmale (13), Identifizieren von Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und dementsprechend Durchführen einer Informationsverdichtung und Ausgeben von Parametern (14) durch ein erstes Neuronales Netz (5), an das die Merkmale (13) angelegt werden, wobei das erste Neuronale Netz (5) eine Eingangsschicht, eine oder mehrere Zwischenschichten und eine Ausgangsschicht aus Neuronen aufweist, wobei die Eingangsschicht mehr Neuronen als die Zwischenschicht(en) und diese wiederum mehr Neuronen als die Ausgangsschicht aufweist und die Neuronen einer Schicht über eine Vielzahl von Verbindungselementen mit variablen Gewichtskoeffizienten verbunden sind,  
 10 Zuführen von Lerneingangssignalen (16) zum ersten Neuronalen Netz (5) und Vergleichen des daraufhin vom ersten Neuronalen Netz (5) ausgegebenen Ausgangssignals (14) mit einem Lehreingangssignal (17) und Ändern von variablen Gewichtskoeffizienten des ersten Neuronalen Netzes (5) mittels Anwendung eines vorbestimnten Lernalgorithmus entsprechend den Differenzen zwischen dem Lehreingangssignal (17) und dem Ausgangssignal (14) oder zur Realisierung eines nicht überwachten Trainings des ersten Neuronalen Netzes (5) mit Hilfe der Lerneingangssignale (16) allein durch eine erste Lehrseinrichtung (7),  
 15 Klassifizieren der Parameter (14), Erkennen von Zusammenhängen zwischen den Parametern (14) und bestimmten Fehlerkonstellationen, dementsprechendes Durchführen einer Informationsverknüpfung und Ausgeben eines Diagnosesignals (15) durch ein zweites Neuronales Netz (6), an das die durch das ersten Neuronale Netz (5) ausgegebenen Parameter (14) angelegt werden, wobei das zweite Neuronale Netz (6) eine Eingangsschicht, eine oder mehrere Zwischenschichten und eine Ausgangsschicht aus Neuronen aufweist, wobei die Eingangs- und die Ausgangsschicht weniger Neuronen als die Zwischenschicht(en) aufweisen, und die Neuronen einer Schicht mit den Neuronen der ihr nachfolgenden Schicht über eine Vielzahl von Verbindungselementen mit variablen Gewichtskoeffizienten verbunden sind, und  
 20 Zuführen von Lerneingangssignalen (18) zum zweiten Neuronalen Netz (6) und Vergleichen des daraufhin vom zweiten Neuronalen Netz (6) erhaltenen Ausgangssignals (15) mit einem Lehreingangssignal (19) und Ändern von variablen Gewichtskoeffizienten des zweiten Neuronalen Netzes (6) mittels Anwendung eines vorbestimmen Lernalgorithmus entsprechend den Differenzen zwischen dem Lehreingangssignal (19) und dem Ausgangssignal (15) durch eine zweite Lehrseinrichtung (8).

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die erfassten physikalischen Parameter (10) einen Ölverbrauch bei bestimmten Triebwerksläufen, Leistungszugzahlen wie Druck und Temperatur in bestimmten Triebwerks-ebene, Parameter aus einer Partikelanalyse in verbrauchtem Öl und in Triebwerksabgasen sowie Parameter aus einer Gasweganalyse enthalten,  
 15 11. Verfahren nach Anspruch 9, wobei bei der Merkmalextraktion anhand der statistischen/probabilistischen Informationen (9) bestimmte Triebwerkskomponenten oder -bauteile beispielsweise als besonders an-

fällig eingestuft werden und diese Informationen in Form von Merkmalen (13) ausgegeben werden.

12. Verfahren nach Anspruch 9, wobei bei dem Verarbeiten der Informationen und Extrahieren von Merkmalen Verfahren verwendet, wie sie zur Spracherkennung üblich sind, und Effektivwerte, Eigenschaften der Hüllkurven, Modulationen, Absolutwerte, Leistungsanalysen, statistische Parameter, Verteilungsfunktionen, Wavelet-Analyse usw. der Schwingungsinformationen im Zeitbereich (11) als Merkmale extrahiert werden.

13. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die Schwingungsinformation im Zeitbereich (11) mit einer Schwingungsanalyseeinrichtung (3) bearbeitet wird und daraus entsprechende Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) ermittelt werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 oder 13, wobei beim Verarbeiten von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) eine Informationsdarstellung in Form eines sogenannten Wasserfalldiagramms verwendet wird, diese Informationsdarstellung mit Bildbearbeitungsverfahren behandelt wird und daraus entsprechende Merkmale aus den Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) ermittelt werden.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 oder 13, wobei

beim Verarbeiten von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) außerdem geometrische Betrachtungen des gesamten Bilds oder bestimmter Bildregionen durchgeführt werden und/oder

beim Bearbeiten von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) außerdem sogenannte "Sky-Lines" des Wasserfalldiagramms aus der Perspektive der Frequenz- bzw. der Zeit/Drehzahlachse betrachtet und daraus entsprechenden Merkmale extrahiert werden.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 oder 13, wobei

beim Bearbeiten von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) die Information der Wasserfalldiagramme außerdem numerisch erfasst werden und Methoden aus der Matrizen- und Vektorrechnung oder Verfahren zur Systemidentifikation im Frequenzbereich zur Gewinnung von Schwingungsinformationen im Frequenzbereich (12) und/oder Übertragungsfunktionen sowie eine Verteilungsanalyse der numerischen Daten einsetzt werden.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei das Klassifizieren, Identifizieren, Informationsverdichten und Ausgeben von Parametern (14) und das Klassifizieren, Erkennen von Zusammenhängen, Informationsverknüpfen und Ausgeben eines Diagnosesignals (15) anstelle durch die ersten und zweiten Neuronalen Netze (5, 6) durch Neuronale Netze in Verbindung mit Fuzzy-Logik oder reine Fuzzy-Logik-Schaltungen durchgeführt wird.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

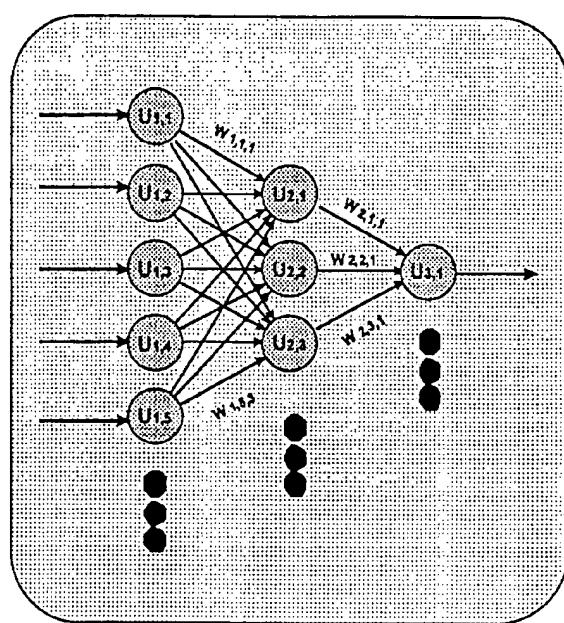


Fig. 1A: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Neuronalen Mehrschicht-Netzes zur Informationsverdichtung

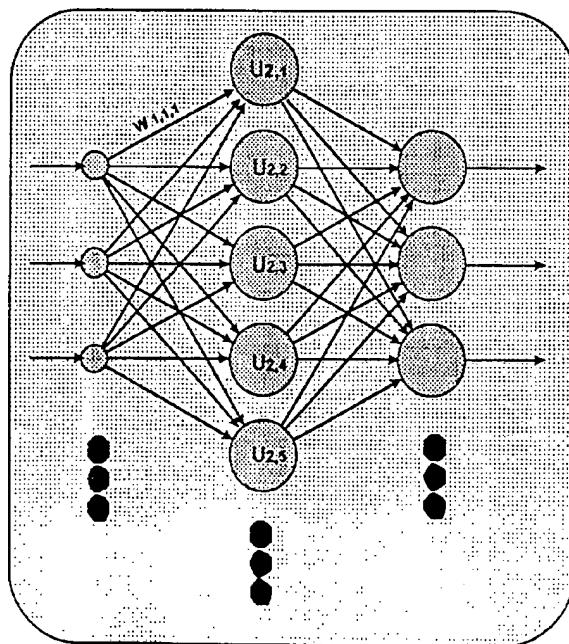


Fig. 1B: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Neuronalen Mehrschicht-Netzes zur Informationsverknüpfung

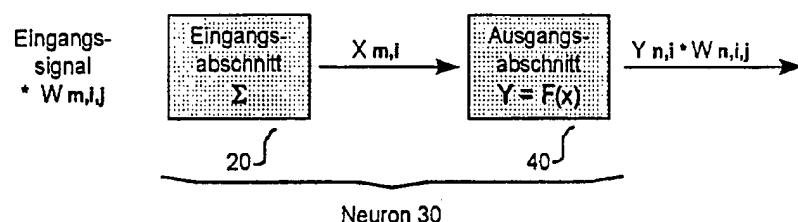


Fig. 1C: Aufbau einer Neuroneneinheit

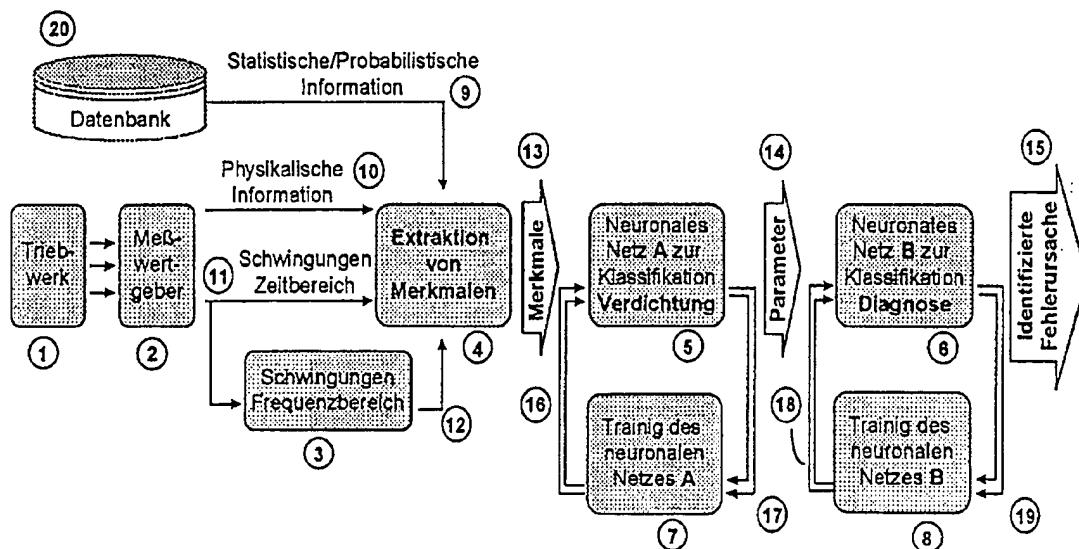


Fig. 2: Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Systems zur Diagnose von Triebwerkszuständen